บทที่ 5
วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การศึกษาวิธีผสม vitamin mix ในสูตรอาหาร

การศึกษาวิธีผสม vitamin mix ที่ให้อาหารซึ่งมีการกระจายตัวของสารอาหารสม่ำเสมอและมีการสูญเสียวิตามินน้อย ทำโดยแปรวิธีผสม 2 วิธี คือผสมอาหารในเครื่องผสมอาหาร 2 นาที เติม vitamin mix ผสมต่อไปจนครบ 5 นาที นำอาหารไปให้ความร้อนที่ 85 องศาเซลเซียสประมาณ 15 นาทีเพื่อละลาย carrageenan กับการผสมในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อละลาย carrageenan และมีอุณหภูมิลดลงถึง 60 องศาเซลเซียสแล้ว ดังนั้นวิธีแรกจึงเป็นการผสมที่วิตามินต้องผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ส่วนวิธีที่ 2 เป็นการเติมและผสมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีที่เหลือในอาหาร พบว่าอาหารที่ได้จากวิธีผสมที่ 2 มีปริมาณวิตามินซีเหลืออยู่สูงกว่าวิธีผสมที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เมื่อคิดเป็นปริมาณการสูญเสียวิตามินซีจากปริมาณที่ใส่ในสูตรอาหาร 2.978 มิลลิกรัม/กรัมอาหาร พบว่าวิธีผสมที่ 1 และ 2 มีปริมาณการสูญเสีย 30.62 และ 21.86 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีผสมที่ 1 วิตามินซีได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า เป็นเวลานานกว่า การสลายตัวจึงสูงกว่า พบว่าปริมาณวิตามินซีที่ตรวจพบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของภาชนะบรรจุไม่มีความแตกต่างกัน ($P \leq 0.05$) จึงอาจกล่าวได้ว่าวิตามินมีการกระจายตัวในอาหารอย่างสม่ำเสมอ (ตารางที่ 1) การใช้วิตามินซีเป็นเกณฑ์ในการตัดสินวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากวิตามินซีไวต่อการสูญเสียจากกระบวนการผลิตสูงกว่าวิตามินชนิดอื่น และสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้ง่าย (30) อย่างไรก็ตามนอกจากอัตราการสูญเสียของวิตามินซีแล้วยังต้องคำนึงถึงความสะดวกและความเป็นไปได้ในกระบวนการผลิตด้วย พบว่าแม้วิธีผสมที่ 2 จะมีการสูญเสียวิตามินน้อยกว่า แต่อาหารจะเริ่มแข็งตัวและมีความหนืดสูงเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 85 องศาเซลเซียส การผสมวิตามินที่ 60 องศาเซลเซียสให้มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ จึงทำได้ยากและอาหารมีโอกาสจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้ไม่สามารถลดขนาดเป็นชิ้นที่สม่ำเสมอได้ นอกจากนั้น การศึกษาสภาวะอบแห้งอาหารด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายในขั้นตอนต่อไป จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิอาหารไว้ที่ 85 องศาเซลเซียสในขณะป้อน เพื่อป้องกันการแข็งตัวของอาหารที่ atomizer จึงไม่อาจใช้วิธีผสมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสได้

ดังนั้น เพื่อให้การเปรียบเทียบปริมาณการสูญเสียของวิตามินจากการอบแห้งวิธีนี้กับวิธีอื่นมีสภาวะตั้งต้นของอาหารไม่ต่างกัน จึงเลือกการผสมที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส สำหรับการเตรียมอาหารเพื่อการทดลองขั้นต่อไป

5.2 การศึกษาสภาวะอบแห้งอาหาร

5.2.1 การอบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่าน

ในการอบแห้งอาหารด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านได้ศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งโดยแปรเป็น 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้เป็นช่วงที่เหมาะสำหรับการอบแห้งอาหารลูกกุ้งวัยอ่อน เพราะไม่ทำให้วิตามินสูญเสียเนื่องจากความร้อนมากเกินไปและใช้เวลานานเกินไป ได้ใช้ปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ในอาหารหลังการทำแห้งเป็นเกณฑ์เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากวิตามินซีไวต่อความร้อนและมีอัตราการสลายตัวเนื่องจากความร้อนเร็วกว่าสารอาหารอื่น ๆ ในสูตรอาหารที่ใช้ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (รูปที่10) จะเห็นว่าช่วงแรกของการอบแห้ง จาก 0-30 นาที อัตราการสูญเสียน้ำจากผลิตภัณฑ์จะค่อนข้างช้า เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้น(28) ในช่วงนี้อุณหภูมิในตู้อบจะลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้เนื่องจากอาหารต้องการพลังงานความร้อนมากในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง wet bulb temperature ของกระแสลมร้อน ช่วงต่อมาที่ปริมาณความชื้น 60 % ถึง 10 % เป็นช่วงที่พลังงานความร้อนทั้งหมดที่อาหารได้รับใช้ไปในการระเหยน้ำเท่านั้น ปริมาณความชื้นของอาหารจึงลดลงอย่างรวดเร็ว อัตราการสูญเสียน้ำจากผลิตภัณฑ์ในช่วงนี้จะคงที่ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราคงตัว (constant rate period)(28) และช่วงสุดท้ายของการอบแห้งคือ ช่วงอัตราลดลง (falling rate period) ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10 % อัตราเร็วในการเสียความชื้นจะลดลงเนื่องจากการหดตัวของเนื้อเยื่อที่แห้งแล้วบริเวณผิว ทำให้น้ำภายในอาหารแพร่ออกมาที่พื้นผิวของอาหารได้ช้ากว่าการระเหยน้ำจากผิววัสดุ อุณหภูมิของวัสดุอาหารจะเริ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าอัตราเร็วในการอบแห้งจะสูงกว่าเมื่อใช้อุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 10 ประมาณเวลาในการอบแห้งอาหารจนมีความชื้น 7 % ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ได้ 370, 320 และ 247.5 นาที ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับการทำแห้งวิธีนี้อุณหภูมิสูงสุดที่ได้ออกแบบไว้ในการทดลองนี้ให้อัตราเร็วในการอบแห้งสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ในอาหาร จะเห็นว่าตัวอย่างที่อบด้วย

อุณหภูมิสูงกว่า (70°C) ไม่จำเป็นว่าจะเกิดการสูญเสียวิตามินซีมากกว่า ($P \leq 0.05$) ตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิต่ำกว่าเสมอไป จากตารางที่ 5 ปริมาณวิตามินที่สูญเสียจากการใช้อุณหภูมิอบ 70 องศาเซลเซียสเท่ากับ 24.39 % ที่ 60 องศาเซลเซียสเท่ากับ 20.64 % และที่ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 25.99 % เนื่องจากในการอบแห้งอาหารที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสต้องใช้เวลานานถึง 370 นาที ประกอบกับการอบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านมีอากาศไหลหมุนเวียนตลอดเวลา ทำให้ปฏิกิริยา oxidation ของวิตามินซีเกิดขึ้นได้สูงและเป็นผลให้มีการสูญเสียเพิ่มขึ้น (32) การอบแห้งอาหารด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคืออาหารมีปริมาณวิตามินซีเหลืออยู่มากที่สุด และใช้เวลาไม่นานเกินไป

5.2.2 <u>การอบแห้งด้วยตู้อบแบบสุญญากาศ</u>

ในการอบแห้งด้วยตู้อบแบบสุญญากาศ ได้ศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งโดยแปรเป็น 50 , 60 และ 70 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่าน ควบคุมความดันสุญญากาศภายในตู้อบให้คงที่ตลอดเวลาที่ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเป็นค่าสูงสุด เพื่อลดเวลาในการอบแห้งให้สั้นที่สุดและลดปฏิกิริยา oxidation ระหว่างการอบแห้ง รูปที่ 13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบสุญญากาศ ซึ่งมีลักษณะเดียวกับรูปกราฟจากการอบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่าน และอัตราเร็วในการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูง จากกราฟดังกล่าวสามารถประมาณเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอาหารจนอาหารมีความชื้น 7 % ที่อุณหภูมิ 50 , 60 และ 70 องศาเซลเซียสได้ 545, 405 และ 315 นาที ตามลำดับ จะเห็นว่าการอบแห้งด้วยวิธีนี้ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้ออกแบบไว้ในการทดลองนี้ให้อัตราเร็วในการอบแห้งสูงสุด และจากการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ในอาหาร (ตารางที่ 7) พบว่าอาหารที่อบด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีปริมาณการสูญเสียวิตามินซีที่น้อยที่สุดที่สุด (11.67 %) และมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส (21.47 % และ 26.03 % ตามลำดับ) แสดงว่าเมื่อระบบเป็นสุญญากาศ เวลาในการอบแห้งไม่มีผลกับการสูญเสียวิตามินซีมากเท่ากับระบบที่มีอากาศสัมผัส ดังนั้นการสูญเสียจึงเกิดจากผลของอุณหภูมิมากกว่า อุณหภูมิอบที่สูงกว่าจึงทำให้วิตามินซีเกิดการสลายตัวได้มากกว่าอย่างชัดเจน(32) จึงเลือกอบแห้งอาหารด้วยตู้อบแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 545 นาที

5.2.3 การทำแห้งโดยวิธี freeze drying

การทำแห้งโดยวิธี freeze drying เป็นการทำแห้งที่รักษาสมบัติเดิมของอาหารได้ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอุณหภูมิในการระเหิดผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารโดยแปรเป็น 32 และ 38 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทั้งหมดในการทำแห้ง 24 ชั่วโมง (รวมเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งอาหาร) พบว่าอุณหภูมิในการระเหิดทั้ง 2 ระดับมีผลต่อปริมาณวิตามินซีและความชื้นของอาหารอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ในอาหารมีค่า 10.22-10.44 มิลลิกรัม/กรัมอาหาร คิดเป็นปริมาณที่สูญเสีย 8.04-9.27 % และผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้าย 4.30-4.34 % ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ 7 % ที่กำหนดไว้สำหรับอาหารกุ้งวัยอ่อนที่ผลิตทางการค้า การที่อุณหภูมิในการการระเหิดมีผลต่อปริมาณวิตามินซีอย่างไม่มีนัยสำคัญ เป็นเพราะสภาวะในการทำแห้งโดยวิธี freeze drying เป็นสภาวะที่ใช้พลังงานความร้อนน้อยมาก และการระเหิดน้ำออกจากอาหารยังทำที่สภาวะสุญญากาศ ดังนั้นการสูญเสียวิตามินซีจึงเกิดขึ้นน้อย สภาวะที่สรุปได้สำหรับการทดลองนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการระเหิดเป็น 32 องศาเซลเซียส เพื่อประหยัดพลังงานในการทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น

5.2.4 การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจาย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีอุปกรณ์ทำให้อาหารเป็นละอองฝอยแบบ rotary disc อาหารเหลวจะถูกสลัดออกเป็นละอองฝอยเป็นมุมประมาณ 180 องศา และสัมผัสลมร้อนที่ผ่านลงมาในทิศทางเดียวกัน เกิดการระเหยของน้ำแล้วผงอาหารแห้งตกลงทางด้านล่าง และแยกจากลมร้อนด้วยระบบไซโคลน

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของอาหารในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายมีหลายปัจจัยด้วยกัน (29) แต่เครื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางสมรรถนะเนื่องจากไม่สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศได้ และขนาดของอาหารที่ได้จากการอบแห้งโดยเครื่องดังกล่าวนี้เล็กกว่า 125 ไมครอน ขณะที่ขนาดอาหารที่ต้องการอยู่ในช่วง 0-250 ไมครอน จึงออกแบบการทดลองโดยปรับความดันลมในการขับเคลื่อน atomizer เป็น 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเป็นระดับความดันต่ำสุดที่สามารถทำให้อาหารเป็นละอองฝอย เพื่อให้ได้อาหารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้ (29) และปรับอัตราการป้อนอาหารให้คงที่ที่ 33 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการป้อนที่เร็วที่สุด เพื่อประหยัดเวลาในการทำแห้ง ดังนั้นตัวแปรที่ศึกษาในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายในงานวิจัยนี้

คือความเข้มข้นของอาหารในรูปเปอร์เซนต์ของปริมาณของของแข็งทั้งหมดในอาหารซึ่งแปรเป็น 14 %, 17 % และ 20 % และอุณหภูมิลมร้อนเป็น 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี ปริมาณความชื้นของอาหาร หาสัดส่วนโดยน้ำหนักของอาหารที่มีขนาด 53-125 ไมครอนและน้อยกว่า 53 ไมครอน และ % yield เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองพบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหารกับอุณหภูมิลมร้อน มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณวิตามินซีของอาหาร และ % yield อย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ปริมาณความชื้นของอาหารที่ได้จากการอบแห้งทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า 7 % คืออยู่ในช่วง 2.92-4.69 % เมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหารอยู่ในระดับต่ำ (14 %) และใช้อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส ปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ในอาหารจะมีค่าสูงอยู่ในระดับเดียวกันกับการทำแห้งที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 20% และใช้อุณหภูมิลมร้อน 160 องศาเซลเซียส แต่ % yield ของผลิตภัณฑ์เมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหารเป็น 14 % จะมีค่าสูงกว่าเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหารเป็น 20 % ซึ่งทั้งนี้อาจเป็นเพราะอาหารที่มีความเข้มข้นสูงจะมีผลทำให้ละอองฝอยมีขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำแห้งน้อย อาหารจึงไม่แห้งขณะลอยตัวอยู่ในภาชนะทำแห้งและเคลื่อนที่ไปติดข้างภาชนะทำแห้ง อย่างไรก็ตามทุกตัวอย่างให้ % yield ที่ค่อนข้างต่ำ (14.14 - 40.37 %) เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีระบบหล่อ เย็นรอบผนังภาชนะทำแห้ง ทำให้ผงอาหารแห้งที่ตกลงมาซึ่งมีอุณหภูมิสูงดูดความชื้นกลับจากอากาศชื้นภายในภาชนะทำแห้งอีก ผงอาหารแห้งจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาพร้อมกับลมร้อนได้และติดอยู่ข้างภาชนะทำแห้ง นอกจากนั้นอาหารถูกสลัดออกจาก atomizer เป็นแนวราบอย่างรวดเร็ว อาหารบางส่วนจึงไม่แห้งขณะลอยตัวอยู่ในภาชนะทำแห้งและเคลื่อนที่ไปติดด้านข้างของภาชนะ ในส่วนของขนาดอนุภาคอาหารนั้นพบว่า ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคอาหาร และไม่มีสภาวะใดที่ให้อนุภาคขนาด 125-250 ไมครอนซึ่งในการเลี้ยงลูกกุ้งระยะ Zoea, Mysis และ Postlarva ต้องการอาหารขนาดอนุภาค <53ไมครอน : 53-125 ไมครอน : 125-250 ไมครอน เป็นอัตราส่วน 2:2:1 ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งแบบพ่นกระจายโดยพิจารณาจากปริมาณวิตามินซีกับ % yield และสภาวะที่เลือกได้คือปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหาร 14 % และอุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส สำหรับการเพิ่ม yield และผลิตอาหารให้ได้ขนาดอนุภาคตามต้องการนั้น ทำได้โดยการเปลี่ยนแบบ atomizer และปรับความดันลมในการ

ขับเคลื่อน atomizer ให้เหมาะสม พร้อมทั้งออกแบบภาชนะทำแห้งให้กว้างขึ้นและมีระบบหล่อ เย็นรอบภาชนะ (29)

5.3 ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของอาหารกุ้งกุลาดำวัยอ่อนที่ได้จากการอบแห้ง 4 แบบ

จากสภาวะที่ดีที่สุดของการทำแห้งแต่ละแบบ ซึ่งได้แก่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 320 นาที ด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่าน, อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 545 นาที ที่ความดันสุญญากาศ 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว ด้วยตู้อบแบบสุญญากาศ, อุณหภูมิในการระเหิดผลึกน้ำแข็ง 32 องศาเซลเซียสด้วยการทำแห้งด้วยวิธี freeze drying และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหาร 14 % อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส ในการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นกระจาย ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพอาหารที่ผลิตด้วยสภาวะดังกล่าวโดยวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในอาหาร วิเคราะห์ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใย และนำอาหารไปเลี้ยงกุ้งกุลาดำวัยอ่อนจากระยะ Zoea3 ถึง Postlarva2 พบว่าอาหารที่อบแห้งด้วยวิธี freeze drying และเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายมีปริมาณวิตามินซีเหลืออยู่ในปริมาณสูงกว่า พวกที่อบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านและตู้อบแบบสุญญากาศอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เมื่อคิดเป็นปริมาณการสูญเสียวิตามินซีจะเห็นว่า อาหารที่อบแห้งด้วยวิธี freeze drying และเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายมีปริมาณการสูญเสีย 8.08 และ 10.49 % ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าปริมาณการสูญเสียของอาหารที่อบแห้งด้วยตู้อบแบบสุญญากาศและตู้อบแบบมีลมเป่าผ่าน (16.58 และ 20.22 % ตามลำดับ) เพราะการทำแห้งด้วยวิธี freeze drying ใช้พลังงานความร้อนต่ำ การสูญเสียวิตามินเนื่องจากความร้อนจึงเกิดขึ้นน้อย ส่วนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจาย ระยะเวลาที่อาหารสัมผัสลมร้อนระหว่างการทำแห้งสั้นมาก การสูญเสียวิตามินซีจึงเกิดได้น้อย ในขณะที่การอบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านมีโอกาสสูญเสียวิตามินจากปฏิกิริยา oxidation ได้มาก และตู้อบแบบสุญญากาศใช้เวลานานในการอบแห้ง ทำให้สูญเสียวิตามินซีเนื่องจากความร้อนได้สูง

ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยของอาหารที่ได้จากการอบแห้งแต่ละวิธี และอาหารที่ผลิตทางการค้า (ตารางที่ 12) ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เป็นที่น่าสังเกตว่า ปริมาณโปรตีน และไขมันของอาหารที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายต่ำกว่าพวกที่อบแห้งด้วยวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีการสูญเสีย casein ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนชนิดเดียวในสูตรอาหาร จากการเกาะติดข้าง

ภาชนะทำแห้งมากกว่าสารอาหารอื่น ๆ เพราะ casein ไม่ละลายน้ำ และมีน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรสูงถึง 0.5882 อัตราเร็วในการเคลื่อนตัวจึงสูง ทำให้เวลาในการลอยตัวอยู่ในภาชนะทำแห้งน้อยและเคลื่อนที่ไปติดข้างภาชนะทำแห้งก่อนที่น้ำจะระเหยออกถึงระดับที่ไม่ทำให้เกิดการเกาะติด และไขมันในอาหารเหลวอาจมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากไม่ได้ผ่านการ homogenize ละอองฝอยของอาหารที่มีปริมาณไขมันมากจะแห้งได้ยากกว่าละอองฝอยที่มีปริมาณไขมันต่ำ (29) ทำให้มีโอกาสสูญเสียจากการเกาะติดข้างภาชนะทำแห้งได้มากกว่า จึงทำให้ปริมาณไขมันที่ตรวจพบในตัวอย่างอาหารที่ทำแห้งวิธีนี้ต่ำกว่าพวกทำแห้งแบบอื่น

การเลี้ยงกุ้งกุลาดำวัยอ่อนจากระยะ Zoea3 ถึง Postlarva2 เป็นเวลา 7 วัน โดยใช้อาหารที่ผลิตจากการทำแห้งทั้ง 4 วิธี เปรียบเทียบกับอาหารธรรมชาติและอาหารที่ผลิตทางการค้า ทำโดยเริ่มเลี้ยงลูกกุ้งวัยอ่อนระยะ Zoea3 จนเติบโตถึงระยะ Postlarva2 เนื่องจากกุ้งวัยอ่อนระยะ Zoea1 และ 2 ยังอ่อนแอ และไวต่อการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมอย่างกะทันหันจึงไม่สามารถย้ายลงในโคนที่ใช้เพาะเลี้ยงได้ และการหยุดการทดลองที่ระยะ Postlarva2 ก็เพราะผู้เพาะเลี้ยงลูกกุ้งนิยมใช้อาหารสำเร็จรูปเลี้ยงลูกกุ้งเฉพาะระยะ Zoea และ Mysis เท่านั้น เมื่อลูกกุ้งสามารถกินไรน้ำเค็มเป็นอาหารได้ จะเลี้ยงด้วยไรน้ำเค็มอย่างเดียวจนถึงระยะที่นำออกจำหน่าย เนื่องจากไข่ไรน้ำเค็มมีราคาถูกกว่ามากเมื่อเทียบกับราคาอาหารสำเร็จรูปและนิสัยของลูกกุ้งชอบกินสิ่งมีชีวิตมากกว่า (15) นอกจากนั้นอาหารที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายไม่มีขนาดอนุภาค 125-250 ไมครอนซึ่งเป็นขนาดสำหรับใช้เลี้ยงลูกกุ้งระยะ Postlarva ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบกับอาหารที่อบแห้งด้วยวิธีอื่นได้ ถ้าเลี้ยงลูกกุ้งเกินระยะดังกล่าวไป ผลการเลี้ยงลูกกุ้งทั้ง 2 ครั้ง คือจากวันที่ 10-16 กรกฎาคม 2533 ซึ่งใช้อาหารสำเร็จรูปที่ผลิตและเก็บที่อุณหภูมิแช่แข็งเป็นเวลา 15 วัน และจากวันที่ 6-12 กันยายน 2533 ซึ่งใช้อาหารสำเร็จรูปที่ผลิตขึ้นและเก็บที่อุณหภูมิแช่แข็งเป็นเวลา 60 วัน พบว่าชนิดของอาหารมีผลต่ออัตรารอดของลูกกุ้งวัยอ่อน ($P \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่ออัตราการเจริญ โดยในการเลี้ยงครั้งที่ 1 อาหารธรรมชาติให้อัตรารอดในลูกกุ้งสูงที่สุดคือ 69.25 % และอาหารที่อบแห้งด้วยวิธี freeze drying และตู้อบแบบสุญญากาศ ให้อัตรารอดในลูกกุ้งสูงระดับเดียวกับอาหารธรรมชาติ แต่ไม่ต่างจากอาหารที่อบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่าน ส่วนอาหารที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายให้อัตรารอดค่อนข้างต่ำแต่อยู่ในระดับเดียวกับอาหารที่ผลิตทางการค้า สำหรับอัตราการเจริญในลูกกุ้งวัยอ่อนไม่แตกต่างกันใน

อาหารทุกตัวอย่างที่ทดลอง โดยความยาวลำตัวทั้งหมดเพิ่มขึ้น 2.52-2.61 มิลลิเมตร โดยเพิ่มจากความยาวเริ่มต้น 2.81 มิลลิเมตร เป็น 5.33-5.42 มิลลิเมตร ส่วนในการเลี้ยงลูกกุ้งวัยอ่อนครั้งที่ 2 พบว่าอาหารธรรมชาติให้อัตรารอดในลูกกุ้งวัยอ่อนสูงที่สุดเช่นเดียวกับในการเลี้ยงครั้งแรกคือ 57 % และอาหารที่อบแห้งด้วยวิธี freeze drying และต้อบแบบสุญญากาศ ให้อัตรารอดในลูกกุ้งอยู่ในระดับเดียวกันแต่ต่ำกว่าอาหารธรรมชาติ คือ 43.25-46.75 % ส่วนอาหารที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายและต้อบแบบมีลมเป่าผ่านให้อัตรารอดต่ำอยู่ในระดับเดียวกัน คือ 35.75 และ 39.00 % ตามลำดับแต่อัตราดังกล่าวนี้ยังสูงกว่าอาหารที่ผลิตทางการค้า (35.75 %) ($P \leq 0.05$) สำหรับอัตราการเจริญในกุ้งกุลาดำวัยอ่อนที่เลี้ยงด้วยอาหารทุกตัวอย่างที่ทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยความยาวลำตัวทั้งหมดเพิ่มขึ้น 2.13-2.44 มิลลิเมตร โดยเพิ่มจากความยาวตั้งต้น 2.65 มิลลิเมตรเป็น 4.78-5.09 มิลลิเมตร

ผลของอัตรารอดและความยาวทั้งหมดของลูกกุ้งวัยอ่อนจากการเลี้ยงแต่ละครั้งไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากคุณภาพของลูกกุ้งที่นำมาใช้ทดลองแตกต่างกัน โดยเฉพาะลูกกุ้งที่มาจากต่างแม่-พ่อกัน หรือวางไข่คนละครั้ง จะมีผลต่ออัตรารอดของลูกกุ้ง เช่น ไข่ที่ได้จากแม่กุ้งที่วางไข่มาแล้วหลายครั้ง จะมีคุณภาพต่ำลง ทำให้อัตรารอดของลูกกุ้งต่ำลง หรือลูกกุ้งที่ได้จากการกระตุ้นให้แม่กุ้งวางไข่โดยการตัดตาจะมีอัตรารอดต่ำกว่าลูกกุ้งที่ได้จากการวางไข่โดยธรรมชาติ เป็นต้น (35) นอกจากนั้นสภาวะที่ใช้ในการเลี้ยงลูกกุ้งก็แตกต่างกัน ถึงแม้จะไม่มากนัก โดยสถานที่ในการเลี้ยงครั้งที่ 1 อยู่ในที่แจ้ง มีหลังคาปิด แต่ไม่มีผนังปิดกั้น ทำให้มีการถ่ายเทของอากาศมากกว่าในระหว่างการทดลองน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 27.3-27.8 องศาเซลเซียสที่เวลา 9.00 น. และ 28.2-29.3 องศาเซลเซียส ที่เวลา 17.00 น. ค่า pH ของน้ำอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 และความเค็ม 30-33 ส่วนในพันส่วน (ตารางที่ 17) ส่วนการเลี้ยงครั้งที่ 2 นั้นเลี้ยงในห้องปิดซึ่งแสงสามารถส่องผ่านเข้ามาในห้องได้เล็กน้อยในช่วงเช้า ในระหว่างการเลี้ยงน้ำมีอุณหภูมิ 28.4-29.0 องศาเซลเซียส ที่เวลา 9.00 น. และ 29.0-29.4 องศาเซลเซียส ที่เวลา 17.00 น. มีค่า pH ระหว่าง 8.0-8.5 และความเค็ม 29.5-31.0 ส่วนในพันส่วน (ตารางที่ 17) และอาหารที่นำมาเลี้ยงลูกกุ้งวัยอ่อนในครั้งที่ 2 อาจมีคุณภาพต่ำลง เนื่องจากเก็บที่อุณหภูมิแช่แข็งเป็นเวลา 2 เดือนในความดันบรรยากาศ ดังนั้นวิตามินที่ถูกออกซิไดซ์ได้ เช่นวิตามินซีอาจมีการสูญเสียไป

จากผลการทดลองเลี้ยงลูกกุ้งวัยอ่อนจากระยะ Zoea3 ถึง Postlarva2 ทั้ง 2 ครั้งแสดงให้เห็นว่าอาหารที่ผลิตขึ้นจากการอบแห้งด้วยวิธี freeze drying และใช้ตู้อบแบบสุญญากาศ ให้อัตรารอดในลูกกุ้งวัยอ่อนเปรียบเทียบได้กับอาหารธรรมชาติ และสูงกว่าอาหารที่ผลิตทางการค้า จึงอาจกล่าวได้ว่าอาหารสำเร็จรูปแบบ microparticulate ที่ผลิตขึ้นจากการอบแห้งด้วยวิธี freeze drying และใช้ตู้อบแบบสุญญากาศสามารถใช้แทนอาหารธรรมชาติได้ การที่อาหารที่ผลิตทางการค้าให้อัตรารอดต่ำในลูกกุ้งวัยอ่อนอาจเนื่องมาจากอาหารมีปริมาณไขมันที่สูงถึง 32.0 % ซึ่งไขมันที่ปริมาณดังกล่าวนี้ เมื่อกระจายอยู่ในน้ำอาจทำให้อากาศละลายลงไปในน้ำได้น้อยลง ลูกกุ้งได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ทำให้น้ำเสียง่าย และอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตรารอดของลูกกุ้งต่ำ นอกจากนั้นปริมาณไขมันที่สูงและปริมาณเส้นใยที่ต่ำเกินไป (0.58 %) อาจมีผลทำให้ระยะเวลาที่อาหารอยู่ในลำไส้สั้นลง การย่อย และการดูดซึมสารอาหารในลำไส้มีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งจากการทดลองของ Borrer และ Lawrence (36) พบว่ากุ้ง P. aztecus เมื่อได้รับอาหารที่มีไขมันในปริมาณสูงเกินไป ค่า apparent protein digestibility (APD) จะต่ำลง และเมื่ออาหารมีปริมาณ cellulose สูงหรือต่ำเกินไป ค่า APD จะต่ำ ส่วนอาหารที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจาย อาจมีปริมาณโปรตีน และไขมันที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกกุ้ง ถึงแม้ว่าอนุภาคจะกลมและมีความสม่ำเสมอมากกว่าพวกที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีอื่น ส่วนอาหารที่อบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านมีการสูญเสียวิตามินค่อนข้างสูง จึงให้อัตรารอดต่ำในลูกกุ้งวัยอ่อน สอดคล้องกับการทดลองของ Teshima และ Kanazawa (17) ซึ่งพบว่าอาหารที่อบแห้งด้วยวิธี freeze drying ให้อัตรารอดในลูกกุ้งวัยอ่อน P. japonicus สูงกว่าอาหารที่อบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านและรูปร่างความสม่ำเสมอของอนุภาคอาหารไม่มีผลต่ออัตราการรอดและอัตราการเจริญ

5.4 ศึกษาอายุการเก็บของอาหารกุ้งวัยอ่อน

การศึกษาอายุการเก็บของอาหารกุ้งวัยอ่อนทำโดยบรรจุอาหารในถุง laminate และ Eval film ภายใต้บรรยากาศของกาซไนโตรเจน แล้วเก็บที่อุณหภูมิ 4-10 องศาเซลเซียส ระหว่างเก็บ วิเคราะห์ปริมาณความชื้น วิตามินซี และค่า TBA ที่เวลา 1, 2, 3 และ 4 เดือนพบว่าเมื่ออายุการเก็บเพิ่มขึ้นปริมาณวิตามินซีในอาหารลดลง ส่วนค่า TBA และความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของวัสดุภาชนะบรรจุต่อปริมาณวิตามินซี และค่า TBA พบว่าไม่มีนัยสำคัญ แต่ผลต่อปริมาณความชื้น

มีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) จากตารางที่ 18 และรูปที่ 20 จะเห็นว่าปริมาณวิตามินซีลดลงจาก 18.26 มิลลิกรัม/กรัมอาหาร เหลือ 7.77-8.32 มิลลิกรัม/กรัมอาหาร ที่เวลา 4 เดือน คิดเป็นปริมาณการสูญเสียเท่ากับ 54.44-57.45 % ส่วนค่า TBA เพิ่มขึ้นจาก 8.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นประมาณ 14 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ตารางที่ 19 และรูปที่ 21) ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 5.96 % เป็น 6.52 % และ 7.33 % ในอาหารที่บรรจุถุง laminate และ Eval film ตามลำดับ(ตารางที่ 20 และรูปที่ 22) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถุง laminate มีสมบัติในการกันความชื้นได้ดีกว่าถุง Eval film เนื่องจากถุง laminate มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเกือบเป็นศูนย์ (37) ขณะที่ Eval film มีค่าดังกล่าวเท่ากับ 5.3 กรัม/ตารางเมตร-วัน ที่ 38 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 90 % การลดของปริมาณวิตามินซีสอดคล้องกับการเพิ่มของค่า TBA เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์เป็นเวลานานขึ้น แสดงให้เห็นว่าระหว่างเก็บมีปฏิกิริยา oxidation ของทั้งไขมันและวิตามินซีในอาหาร ทำให้ malonaldehyde ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากปฏิกิริยา oxidation ของไขมันไม่อิ่มตัวในอาหารสูงขึ้น และวิตามินซีถูก oxidise ไปอยู่ในรูปที่ไม่มีคุณค่าทางอาหาร (32) แต่เมื่อพิจารณาปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ในอาหาร หลังเก็บอาหารไว้เป็นเวลานาน 4 เดือน ที่อุณหภูมิ 4-10 องศาเซลเซียสแล้วพบว่ายังเพียงพอต่อความต้องการของลูกกุ้งวัยอ่อนซึ่งมีความต้องการ 300-1000 มิลลิกรัม/อาหาร 100 กรัม (8) และอาหารยังไม่มีกลิ่นหืน จึงสรุปได้ว่าอาหารกุ้งวัยอ่อนที่บรรจุภายใต้บรรยากาศของกาซไนโตรเจน เก็บที่อุณหภูมิ 4-10 องศาเซลเซียส ได้นานอย่างน้อย 4 เดือน แต่คุณภาพของอาหารลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผลิตใหม่ และถุง laminate จาก OPP/PE/Al/PE/PE film เป็นวัสดุภาชนะบรรจุอาหารกุ้งวัยอ่อนที่ดีกว่าถุง Eval film ในด้านการให้การป้องกันการเสียคุณภาพ

5.5 <u>การประมาณต้นทุนในการผลิตอาหารกุ้งวัยอ่อน</u>

การประมาณต้นทุนในการผลิตอาหารกุ้งวัยอ่อน โดยพิจารณาจากค่าใช้จ่ายหลัก ได้แก่ ค่าวัสดุอาหาร ค่าวัสดุภาชนะบรรจุ และค่าพลังงานในการทำแห้งอาหาร พบว่าค่าวัสดุอาหารที่ใช้ในการผลิตอาหาร 100 กรัมคือ 27.48 บาท โดยส่วนประกอบอาหารที่มีราคาสูงในสูตรอาหารที่ใช้ ได้แก่ casein ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนเพียงแหล่งเดียวในสูตรอาหาร คิดเป็นต้นทุน 46.03 % ของค่าวัสดุอาหารทั้งหมด นอกจากนั้น micronutrient เช่น Glucosamine-HCl, vitamin mix, cholesterol และ mineral mix ก็

เป็นส่วนประกอบอาหารที่ทำให้ต้นทุนค่าอาหารสูงเช่นกัน สำหรับค่าวัสดุภาชนะบรรจุอาหารกุ้งวัยอ่อนมีราคาประมาณ 1.70 บาทต่อชิ้นต่อการบรรจุอาหาร 100 กรัม ซึ่งค่าใช้จ่ายในการบรรจุอื่น ๆ เช่น กาซไนโตรเจนและค่าไฟฟ้าไม่สามารถประมาณได้ และเป็นค่าใช้จ่ายที่น้อย จึงมิได้นำมาประมาณต้นทุน เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการทำแห้งทั้ง 4 วิธี พบว่าการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจาย เสียค่าพลังงานต่ำที่สุดคือ 5.53 บาทต่อการผลิตอาหาร 100 กรัม เมื่อประมาณให้ % yield เป็น 32 % ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 3.9.4 และมีข้อดีคืออาหารที่ได้จากการอบแห้งแบบนี้ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการบดให้มีขนาดเล็กอีก ส่วนการทำแห้งด้วยวิธี freeze drying มีค่าใช้จ่ายในการทำแห้งสูงที่สุดถึง 44.97 บาทต่อการผลิตอาหาร 100 กรัม และการอบแห้งด้วยตู้อบแบบมีลมเป่าผ่านและแบบสุญญากาศเสียค่าพลังงานใกล้เคียงกันคือ 11.48 และ 15.39 บาทต่อการผลิตอาหาร 100 กรัมตามลำดับ นอกจากการพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการทำแห้งแล้ว สิ่งที่ควรคำนึงถึงอย่างมากก็คือราคาของเครื่องมือทำแห้ง รวมทั้งการติดตั้ง ซึ่งมีความสำคัญในการเริ่มลงทุนในการผลิตระดับอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายจะใช้ค่าพลังงานในการทำแห้งต่ำที่สุด แต่การลงทุนสร้างโรงงานและซื้อเครื่องมือพร้อมทั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อให้กระบวนการทำแห้งมีประสิทธิภาพ เช่น % yield สูง อาหารมีขนาดอนุภาคตามต้องการ การสูญเสียสารอาหารต่ำ ต้องใช้การลงทุนที่สูง เป็นต้น เครื่องมืออบแห้งที่น่าสนใจคือ ตู้อบแบบสุญญากาศ ซึ่งใช้ค่าพลังงานในการทำแห้งต่ำและการลงทุนสร้าง plant ไม่สูงนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี ซึ่งต้นทุนในการผลิตเมื่อรวมค่าวัสดุอาหาร วัสดุภาชนะบรรจุและค่าพลังงานที่ใช้ในการทำแห้งแบบสุญญากาศ เป็นเงินประมาณ 44.57 บาทต่อ 100 กรัม หรือประมาณ 450 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นราคาที่ต่ำกว่าราคาของอาหารที่ผลิตทางการค้าที่จำหน่ายในท้องตลาด คือ 2,500-3,500 บาทต่อกิโลกรัม การผลิตอาหารกุ้งวัยอ่อนแบบ microparticulate ขึ้นใช้เองภายในประเทศจึงเป็นอุตสาหกรรมที่น่าสนใจอย่างยิ่ง